

Aalborg Universitet



AALBORG UNIVERSITY  
DENMARK

## Målestation for hydrologiske målinger i afløbssystem

Larsen, Torben

*Publication date:*  
1978

*Document Version*  
Også kaldet Forlagets PDF

[Link to publication from Aalborg University](#)

*Citation for published version (APA):*

Larsen, T. (1978). *Målestation for hydrologiske målinger i afløbssystem*. Laboratoriet for Hydraulik og Havnebygning. Bulletin Nr. 14

### General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal -

### Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at [vbn@aub.aau.dk](mailto:vbn@aub.aau.dk) providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.



BULLETIN NR. 14

TORBEN LARSEN

MÅLESTATION FOR HYDROLOGISKE  
MÅLINGER I AFLØBSSYSTEM

AALBORG UNIVERSITETSCENTER  
LABORATORIET FOR HYDRAULIK OG HAVNEBYGNING  
SOHNGÅRDHOLMSVEJ 57 DK-9000 AALBORG DANMARK

AALBORG UNIVERSITETSCENTER

INSTITUTTET FOR VAND, JORD OG MILJØTEKNIK

Sohngårdsholmsvej 57 DK-9000 Aalborg Danmark telefon (08) 142333

LABORATORIET FOR HYDRAULIK OG HAVNEBYGNING

Ingeniørdocent H. F. Burcharth

Torben Larsen

BULLETIN NR. 14

MÅLESTATION FOR HYDROLOGISKE

MÅLINGER I AFLØBSSYSTEM

SEPTEMBER 1978

INDHOLDSFORTEGNELSE:

1. Indledning	side	1
2. Resume	side	2
3. Beskrivelse af målestationens opland	side	3
4. Måling af nedbør	side	4
5. Måling af vandføring	side	5
6. Skitse til afstrømningsmodel	side	7
7. Foreløbige måleresultater	side	10
8. Litteratur	side	11

BILAGSFORTEGNELSE:

Måleopland ved Rihimækivej, Aalborg	Bilag nr.	1
Nedbørsmåler	Bilag nr.	2
Målerende for vandføringsmåling	Bilag nr.	3
Målte værdier af nedbør og afstrømning	Bilag nr.	4



## 1. Indledning

Måling af vandføring i lukkede afløbssystemer er forbundet med en række praktiske vanskeligheder. I forbindelse med arbejdet i en af "Spildevandskomiteen" nedsat arbejdsgruppe vedrørende vandføringsmåling og prøveoptagning i afløbssystemer (litt. [1]) blev det klart, at de eksisterende målesystemer var mangelfulde. Man indledte derfor en udvikling af en målerende specielt med henblik på placering i afløbssystemer og resultatet heraf blev den i afsnit 5 omtalte målerende for måling af vandføring i både delvist fyldte rør og i fuldtløbende rør. Dette arbejde blev udført af civ.ing., lic.techn. Torben Willemoes Jørgensen og civ.ing. Torben Larsen.

På foranledning af civ.ing. Poul Klingberg, Aalborg kommunes tekniske forvaltning har man foretaget en praktisk afprøvning af målerenden i et afløbssystem for et mindre opland i Mariendals Mølle kvarteret i den sydlige del af Aalborg. Formålet med denne afprøvning har været at give Aalborg kommune bedre indgangsparametre for den EDB-model som er opstillet for Aalborgs afløbssystem. Derfor har man desuden placeret en nedbørsmåler i det aktuelle opland.

Herværende rapport giver primært en beskrivelse af måleprincipperne for målestationen. Da der kun indtil nu er indløbet relativt få relevante måleresultater, har man kun skitsemæssigt angivet, hvorledes måleresultaterne eventuelt vil kunne behandles. En nøjere behandling af måleresultater vil følge i en senere rapport, formentlig i slutningen af 1979.

## 2. Resumé

Ved et måleopland i det sydlige Aalborg på omkring 1,9 ha, hvoraf 1,36 ha er impermeable flader, har man oprettet en målestation for hydrologiske målinger af afstrømningsprocessen. Målestationen består af en specielt udviklet henholdsvis nedbørsmåler og målerende. Måleudstyret er forbundet til samme registreringsudstyr, som derved sikrer, at nedbørsmåling og vandføringsmåling sker synkront.

De foreløbige resultater for et begrænset antal regnskyl af moderat styrke giver anledning til følgende foreløbige konklusioner:

Inden for en nøjagtighed på skønsmæssig 10% kan iagttages, at der er en lineær sammenhæng mellem nedbørsmængde  $R$  ( $\text{m}^3/\text{ha}$ ) og afstrømningsmængde  $Q$  ( $\text{m}^3$ ) således at

$$Q = A \cdot R - T$$

hvor det effektive afstrømningsareal  $A = 1,10$  ha og tabet  $T = 6,1 \text{ m}^3$ .

Afstrømningskoefficienten i relation til oplandets areal af impermeable flader er på grundlag heraf bestemt til 0,81. Sættes tabet i relation til de impermeable flader, svarer dette til 0,55 mm.

Afstrømningsforløbet kan beskrives ved anvendelse af en simpel hydrologisk model, idet man har tilpasset en model bestående af to serieforbundne reservoirer med uens reservoirkonstanter til de målte nedbørs- og afstrømningsforløb. Systemets forsinkelse, dvs. den tidsmæssige afstand mellem tyngdepunktet af henholdsvis nedbør og afstrømning, er omkring 5 min.

### 3. Beskrivelse af målestationens opland

Måleoplandet er beliggende i den sydlige udkant af Aalborg på den højestliggende del af den moræneknold, som danner den vestlige begrænsning af den karakteristiske ådal som strækker sig fra Aalborgs centrum i sydlig retning. Terrænkoten ligger mellem 33 og 36 m. Området er et industriområde med store flade lagarealer og store impermeable, befæstede arealer. Oplandet er vist på bilag nr. 1.

Afstrømningsarealet er opgjort til 1,87 ha og de samlede impermeable arealer er opmålt til 1,36 ha. Hovedafløbssystemet har en længde af 315 m og et gennemsnitsfald på 13%. Den hydrauliske gennemløbstid er ca. 3,2 min. Ved målestationen har ledningen en diameter på 40 cm og systemet er et såkaldt fællessystem for både regnvand og spildevand. Hovedlednings-systemets volumen er ca. 30 m<sup>3</sup>.

Nedbørsmåleren er placeret umiddelbart ved stationen for vandføringsmåling og afstanden fra nedbørsmåleren til oplandets tyngdepunkt er omkring 60 m og afstanden til oplandets fjerneste punkt er ca. 140 m.

#### 4. Måling af nedbør

Nedbørsmåleren er konstrueret ved laboratoriet og er vist på bilag nr. 2.

Princippet i nedbørsmåleren er, at den i tragten opsamlede regn drypper ned i det cylindriske måleglas. I bunden af måleglasset er placeret en tryktransducer som måler højden af den ovenliggende vandsøjle. Måleglasset er forsynet med en hævert som automatisk tømmer en veldefineret vandmængde ud af måleglasset, når dette er fyldt op til hævertens højeste punkt. Herved kan systemets kalibrering løbende kontrolleres.

En nedbørsmåler med dette måleprincip angiver den akkumulerede regnmængde, hvilket giver en sikker bestemmelse af den totale regnmængde i et regnskyl. Regnintensiteten bestemmes ud fra hældningen på denne sumkurve eller ved aflæsning af den akkumulerede nedbørsmængde pr. tidsenhed, hvilket i det aktuelle tilfælde er 1 min.

Nedbørsmåleren er placeret i et buskads af vilde roser, således at tragten stort set er i niveau med buskadsets top, hvilket skønnes at minimere målerens påvirkelighed af vindforholdene. Terrænformen og nærliggende bygninger giver dog anledning til at formode, at måleren vil registrere for små nedbørsmængder under kraftige vinde fra syd. Nedbørs-situationer hvor det er tilfældet vil derfor indtil videre ikke blive anvendt ved den fortsatte databehandling.

## 5. Måling af vandføring

Vandføringen i afløbsledningen måles med en specielt udviklet og patentanmeldt målerende. På bilag nr. 3 er vist princippet for målerenden og dens placering i en nedgangsbrønd.

Målerenden adskiller sig fra de traditionelle målerender ved at være i stand til at måle vandføringen både i fuldtløbende rør og delvist fyldte rør, idet man har kombineret principperne fra venturikanalen og venturirøret. Målerenden giver røret en trekantformet indsnævring i nederste halvdel af røret. Fra 0 til 85% fyldning af røret vil målerenden fremkalde en kritisk strømning ved indsnævringen, således at der er en entydig sammenhæng mellem vandføring og opstrøms vandspejlshøjde. I fuldtløbende tilstand vil indsnævringen medføre en trykdifferens mellem indsnævring og et punkt opstrøms herfor og i dette tilfælde vil der være en entydig sammenhæng mellem vandføringen og denne trykdifferens. Derfor måles trykket i to punkter i målerenden, i et punkt ved indsnævringen og i et punkt opstrøms herfor. Indsnævringen er udformet med særligt henblik på afløbssystemer således at faste partikler herunder sand uhindret kan passere.

Målerenden er kalibreret i laboratoriet. Ved delvist fyldte rør er følgende sammenhæng mellem vandføring og opstrøms vandspejlshøjde  $h$  (i cm) bestemt

$$q = 0,00642 h_1^{2.83} \quad \text{l/sec}$$

Det skal bemærkes, at dette udtryk kun kan forventes at være gældende for en målerende med den her anvendte diameter (38,5 cm) og placering af målepunkt. Målingen af  $h$  foretages ved et trykudtag i bunden af målerenden ved anvendelse af det velkendte bobleprincip.

Ved fuldtløbende rør angiver kalibreringen følgende sammenhæng

$$q = 0,0423 D^2 \sqrt{h_1 - h_2}$$

hvor  $D$  er diameteren i blenden i cm,  
 $h_1 - h_2$  er trykdifferensen i cm vandsøjle  
 $q$  er vandføringen i l/s.

Målerendens kalibrering og måleudstyrets virkemåde blev kontrolleret in situ, idet man fra en brandstander tillodte kendte vandføringer til afløbssystemet. Overensstemmelsen mellem kalibrering og disse målinger



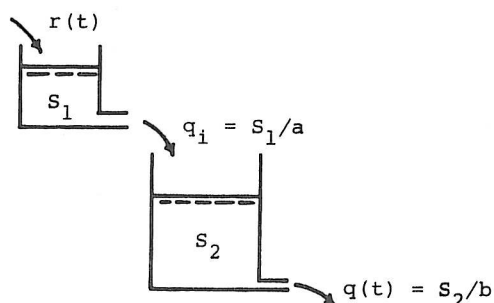
viste sig at ligge inden for systemets kalibreringsnøjagtighed dvs. inden for 5-8%'s afvigelse. Denne kontrol af målerenden blev foretaget med velvillig assistance af justermester P. Sigtenborg, Aalborg kommunes tekniske forvaltning.

Ovennævnte nøjagtighed kan kun forventes opnået såfremt målerenden placeres omhyggeligt vandret i brønden og såfremt man på stedet måler trykudtagenes højdemæssige placering og indfører den heraf fremkomne nødvendige korrektion i kalibreringsformlerne. De hidtidige erfaringer synes at vise, at niveaumålingen med bobleudstyret herefter kan gøres med en nøjagtighed på omkring 5 mm, hvilket netop må siges at være acceptabelt, selvom en bedre nøjagtighed formentlig skulle kunne opnås med andre typer niveaumåleudstyr. Fordelen ved bobleudstyret er imidlertid, at den tryktransducer, som gennem lufttrykket registrerer vand-spejlsniveauet, kan placeres under kontrollerede temperaturforhold og på et sted, hvor transducerens kalibreringskonstanter simpelt kan kontrolleres uden at målerenden skal flyttes.

## 6. Skitse til afstrømningsmodel

Måleresultaterne påtænkes foreløbig behandlet efter traditionelle hydrologiske principper, idet der forsøges opstillet en empirisk sammenhæng mellem nedbør og afstrømning. Man har indledningsvis forsøgt at tilpasse en lineær model bestående af to serieforbundne lineære reservoirer til måleresultaterne. Anvendelse af lineær model kræver, at måleresultaterne korrigeres for de umiddelbare erkendte ulineariteter, som bl.a. baseflow, fugtnings- og lavningstab m.v.

Modellen er følgende



Ved kontinuitetsbetragtninger for hver af reservoirerne fås

$$\begin{aligned} r(t) - q_1 &= \frac{ds_1}{dt} \\ q_1 - q(t) &= \frac{ds_2}{dt} \end{aligned}$$

Disse kan sammenfattes til

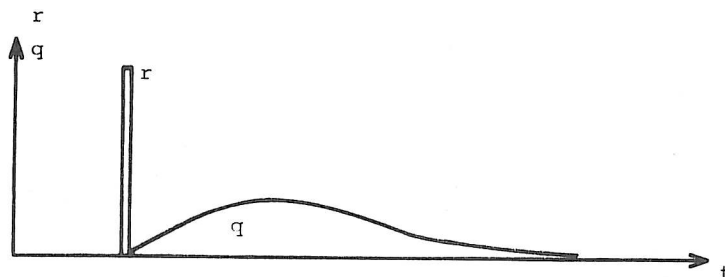
$$ab \frac{d^2 q}{dt^2} + (a + b) \frac{dq}{dt} + q = r \quad (1)$$

Impulsresponsfunktionen svarende til en uendelig kortvarig tilført enhedsnedbørsmængde kan beregnes til

$$U(0, t) = \frac{1}{a - b} \left[ e^{-\frac{t}{a}} - e^{-\frac{t}{b}} \right] \quad (2)$$

For en vilkårlig varierende nedbør  $r(t)$  kan afstrømningsforløbet beregnes udfra foldningsintegralet

$$q(t) = \int_0^t r(\tau) U(0, t - \tau) d\tau \quad (3)$$



Forsinkelsen  $t_p$  mellem impuls  $r$  og maksimal afstrømning bestemmes ved

$$\frac{d(U(0,t))}{dt} = 0 \quad \text{hvorved med anvendelse af (2) fås}$$

$$t_p = a \frac{\ln \frac{a}{b}}{1 - \frac{a}{b}} \quad (4)$$

Vedrørende forsinkelsen kan det iøvrigt vises, at tidsafstanden mellem tyngdepunktet i nedbørsforløbet og tyngdepunktet i det tilhørende afstrømningsforløb er det samme som tidsafstanden mellem impuls og tyngdepunkt i impulsresponsfunktion.

Tidsafstanden mellem impuls og tyngdepunkt i impulsrespons bestemmes af 1. moment af impulsresponsfunktionen

$$t_\ell = \int_0^\infty t U(0,t) dt = \int_0^\infty t \left( \frac{1}{a-b} \right) \left[ e^{-\frac{t}{a}} - e^{-\frac{t}{b}} \right] dt = \frac{a+b}{2} \quad (5)$$

For et konkret observationsmateriale bestemmes  $a + b$  derfor simpelt blot ved bestemmelse af tidsafstanden mellem tyngdepunkt af henholdsvis nedbørsforløb og afstrømningsforløb.

Dannes forholdet mellem  $t_p$  og  $t_\ell$  ud fra formel (4) og (5) får man et middel til at bestemme  $\frac{a}{b}$  idet man får

$$\frac{t_p}{t_\ell} = \frac{\ln \frac{a}{b}}{(1 - \frac{a}{b})(1 + \frac{1}{\frac{a}{b}})} \quad (6)$$

Sammenhørende værdier af  $\frac{t_p}{t_\ell}$  og  $\frac{a}{b}$  kan tabelleres

$\frac{a}{b}$	$\frac{t_p}{t_\ell}$
1	0,50
1,5	0,49
2	0,46
3	0,41
4	0,37
6	0,31
8	0,26
12	0,21

Det skal bemærkes, at  $t_p$  skal måles på afstrømningsforløb som har været impulsformede, hvilket formentlig gør bestemmelsen af  $t_p$  usikker, idet meget kortvarige regnskyl i sagens natur næppe kan forventes at have været jævnt fordelt over oplandet.

#### Bemærkninger til valg af model for afstrømning.

Som udgangspunkt for valg af model har man primært vurderet den i [2] foretagne sammenligning mellem de i dag tilgængelige modeller. Der konkluderes heri, at afstrømningsberegninger for urbane områder ud fra enhedshydrografmetoden fører til resultater, som er rimeligt i overensstemmelse med faktisk observerede vandføringer. Der findes i litteraturen bl.a. i [4] og [6] en lang række eksempler på forslag til enhedshydrografer til dette formål. Da det ikke har været hensigten med herværende arbejde at gå dybere ind i diskussionen om den mest hensigtsmæssige enhedshydrograf, hvad observationsmaterialet naturligvis heller ikke tillader, har man udvalgt en model som indeholder to modelparametre. Man har indledningsvis forsøgt, om en model med kun een modelparameter har kunnet anvendes, men resultaterne var for utilfredsstillende.

I [6] angives følgende empiriske sammenhæng mellem oplandskarakteristika og modelparametre

$$\begin{aligned} a + b &= 7,6 + 0,016A - 150S && \text{min} \\ a &= 0,41b + 0,86 && \text{min} \end{aligned}$$

hvor A er oplandets areal i ha og S er oplandets fald (i rent tal).

Det angives, at metoden har været omhyggeligt sammenlignet med den velkendte, engelske RRL-metode med tilfredsstillende resultat. Man har dog ikke haft materiale til rådighed til nærmere vurdering af dette.

En afstrømningsberegning på grundlag af en sådan empirisk enhedshydrograf er vel formentlig den simpleste forsinkelsesberegning man kan foretage og vil være et udmærket hjælpemiddel ved overslagsmæssige beregninger, også i større systemer. Det må understreges, at metoden naturligvis ikke kan erstatte de nyere numeriske modeller, som med større eller mindre tilnærmelse er i stand til at simulere de korrekte hydrauliske og hydrologiske processer i afstrømningen.

På det aktuelle måleopland ville det formentlig være muligt af opstille en differentieret overfladeafstrømningsmodel indeholdende de forekommende hydrologiske delprocesser. Til trods for, at de foreliggende måleresultater øjensynligt indeholder detaljer, som kun kan beskrives ud fra en sådan mere fysisk rigtig beskrivelse af afstrømningsprocessen, vil man foreløbig begrænse sig til den rene empiriske synsvinkel.

## 7. Foreløbige måleresultater

Da målestationen hidtil kun har fungeret i få måneder foreligger kun et meget begrænset observationsmateriale. Udvalgt blandt dette er på bilag nr. 5 angivet nogle måleresultater fra 11.8.78. Nedbøren den 11.8.78 faldt med relativ konstant intensitet fra en kraftig tordenbyge, som langsomt passerede området. På bilaget ses desuden de målte vandføringer.

Sammenholdes de totale nedbørsmængder  $R(\text{m}^3/\text{ha})$  for hvert af regnskylle-  
ne med nettoafstrømningsmængderne  $Q(\text{m}^3)$  (dvs. der er korrigeret for  
baseflow) fås følgende sammenhæng

$$Q = 1,10 R - 6,1 \text{ m}^3$$

hvor enheden for  $Q$  er  $\text{m}^3$  og enheden for  $R$  er  $\text{m}^3/\text{ha}$ . Man kan heraf bestemme, at lavnings- og befugtningstabet er ca.  $5 \text{ m}^3/\text{ha}$ . Da det befæstede areal udgør  $1,36 \text{ ha}$  kan herefter bestemmes en afstrømningskoefficient på  $0,81 (\pm 10\%)$ .

Systemets forsinkelse, dvs. tidsafstanden mellem nedbørens tyngdepunkt og afstrømningens tyngdepunkt, ligger gennemsnitlig på ca.  $5,1 \text{ min}$ .

Tilpasning af den i forrige afsnit omtalte enkle empiriske model er foretaget på baggrund af ovennævnte resultater og på bilag nr. 5 har man angivet simulerede værdier ved anvendelsen af modellen for værdierne af konstanterne  $a = 1,6 \text{ min}$ ,  $b = 3,5 \text{ min}$ .

Afslutningsvis skal man gøre opmærksom på, at den angivne afstrømningskoefficient forekommer lidt større end hvad litteraturen angiver som gennemsnit for områder af denne størrelse. Måleusikkerhed og begrænset observationsmateriale kan være årsagen hertil.



## 8. Litteratur

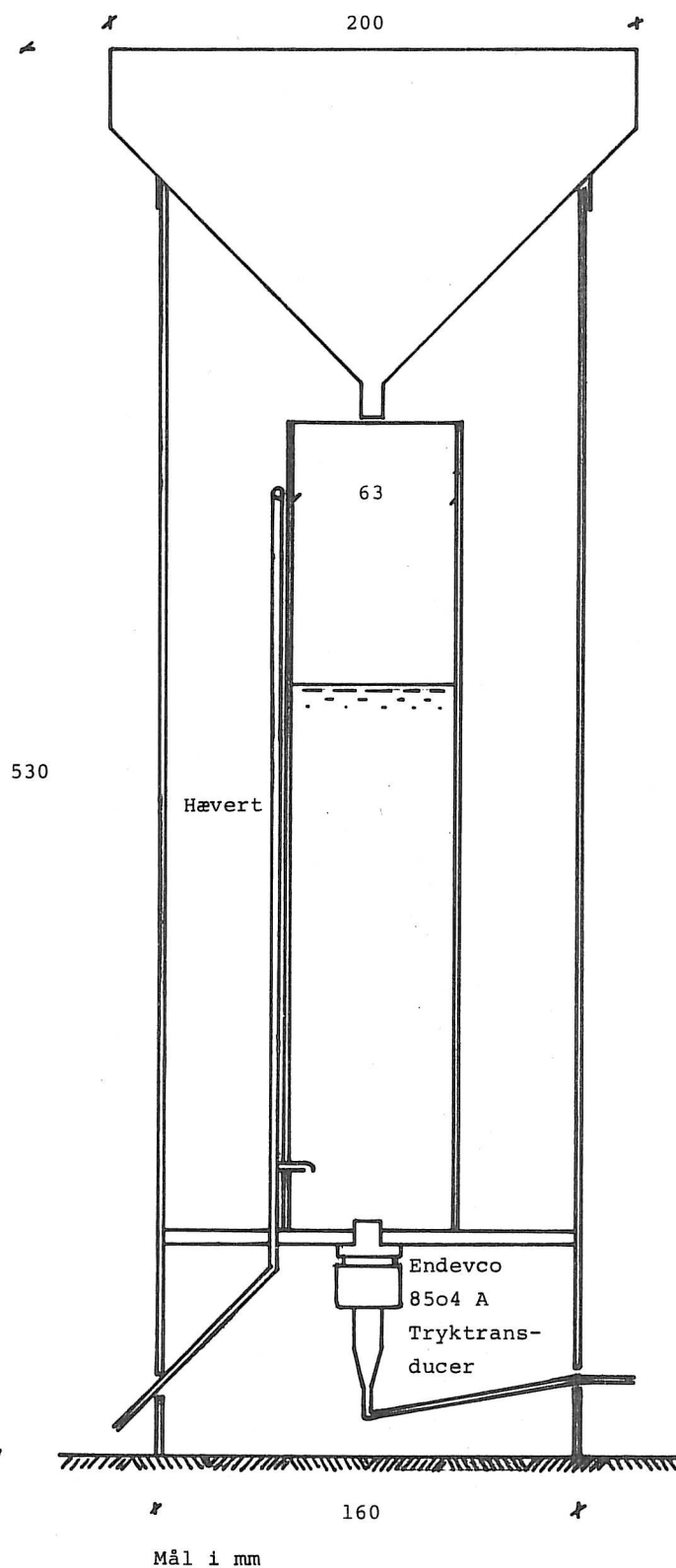
- [1] Spildevandskomiteen, Dansk Ingeniørforening (1976): "Vandføringsmåling og prøveoptagning".
- [2] Chow, Ven Te og Yen (1976): "Urban stormwater runoff - Determination of volumes and flowrates".  
EPA-600/2-76-116 USA
- [3] Kraijenhoff van de Leur, D.A. (1966): "Runoff models with linear elements", Recent trends in hydrograph synthesis, Versl. en Meded. Comm. Hydrol. Onders, TNO 13, The Hague.
- [4] Eagleson, P.S. (1962): "Unit hydrograph Characteristics for Sewered Areas", J. Hydraulics Div., ASCE vol. 88 HY 2 1962.
- [5] Chow Ven Te (editor) (1964): "Handbook of Applied Hydrology"  
McGraw-Hill, New York.
- [6] Nussey, B.B. and E.J. Sarginson (1978): "A Linear reservoir model for urban runoff", Proc. from International Conf. on Urban Storm Drainage, University of Southampton, 1978.

Bulletiner fra Laboratoriet for Hydraulik og Havnebygning:

- Bulletin nr. 1 H. F. Burcharth og Torben Larsen  
"Introduktion af laboratoriet" december 1971
- Bulletin nr. 2 H. F. Burcharth og Torben Larsen  
"Elementær laboratoriepraktik for bygningsingeniør-  
studerende" april 1972
- Bulletin nr. 3 Michael Brorsen, H. F. Burcharth og Torben Larsen  
"Stabilitet af doloskråninger" marts 1973
- Bulletin nr. 4 Strandby havn Ny forhavn  
Modelforsøg med bølgeuro, april 1973
- Bulletin nr. 5 Referat af studierejse til Holland,  
efteråret 1973
- Bulletin nr. 6 Helsingør Nordhavn  
Modelforsøg med bølgeuro, april 1974
- Bulletin nr. 7 H. F. Burcharth  
"Forslag til lystbådehavne i Aalborg" august 1974
- Bulletin nr. 8 K. Erling Navntoft  
"Metode til samtidig måling af hastighed og sedi-  
mentkoncentration i stationære strømninger med  
sediment i suspension" august 1974
- Bulletin nr. 9 M. Brorsen, H. F. Burcharth og Torben Larsen  
"Stability of dolos slopes" august 1974
- Bulletin nr. 10 Strandby havn  
Rapport om modelforsøg med stenmole, oktober 1974
- Bulletin nr. 11 Torben Larsen  
"Bestemmelse af Limfjordens nettostrøm" april 1978
- Bulletin nr. 12 H. F. Burcharth  
"The effect of waves with different patterns on  
on-shore structures" juni 1978
- Bulletin nr. 13 H. F. Burcharth og M. Brorsen  
"On the design of gravity structures using wave  
spectra" maj 1978
- Bulletin nr. 14 Torben Larsen  
"Målestation for hydrologiske målinger i afløbs-  
system" september 1978

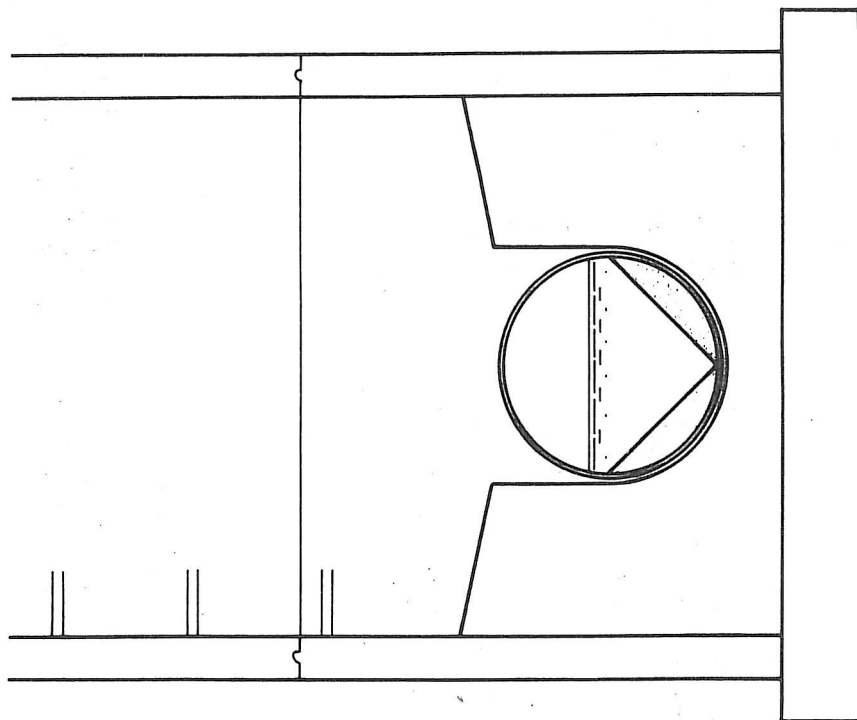


Lodret snit

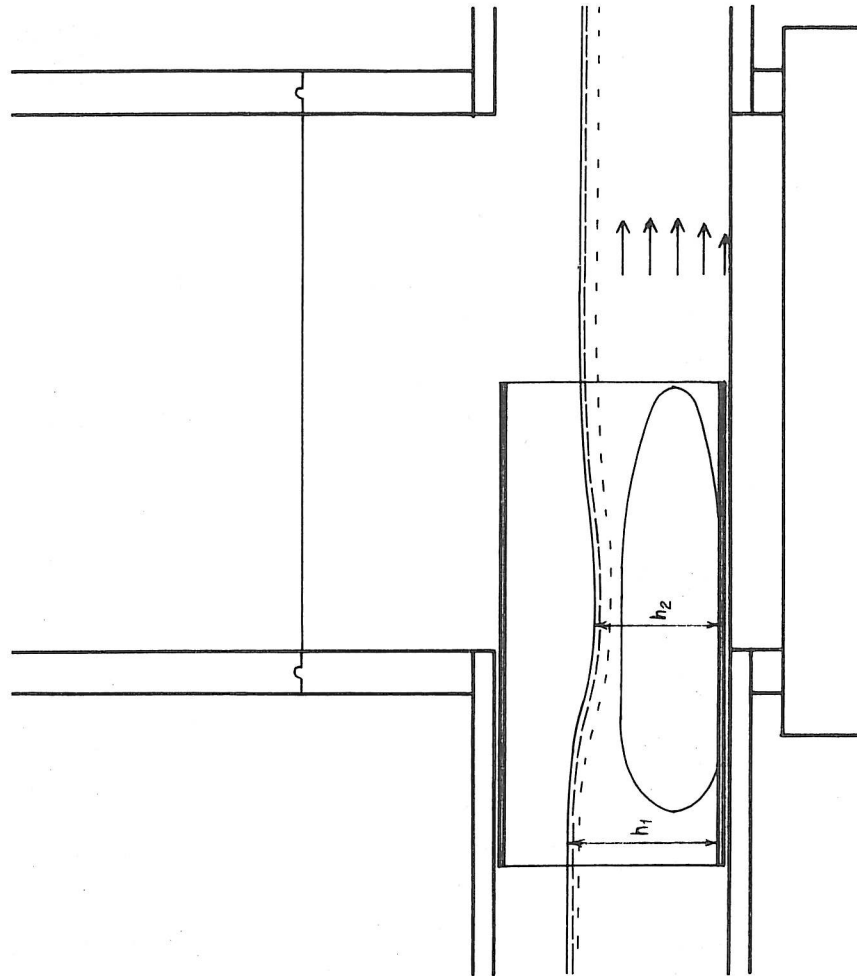


Laboratoriet for Hydraulik og Havnebygning  
Aalborg Universitetscenter

Nedbørsmåler

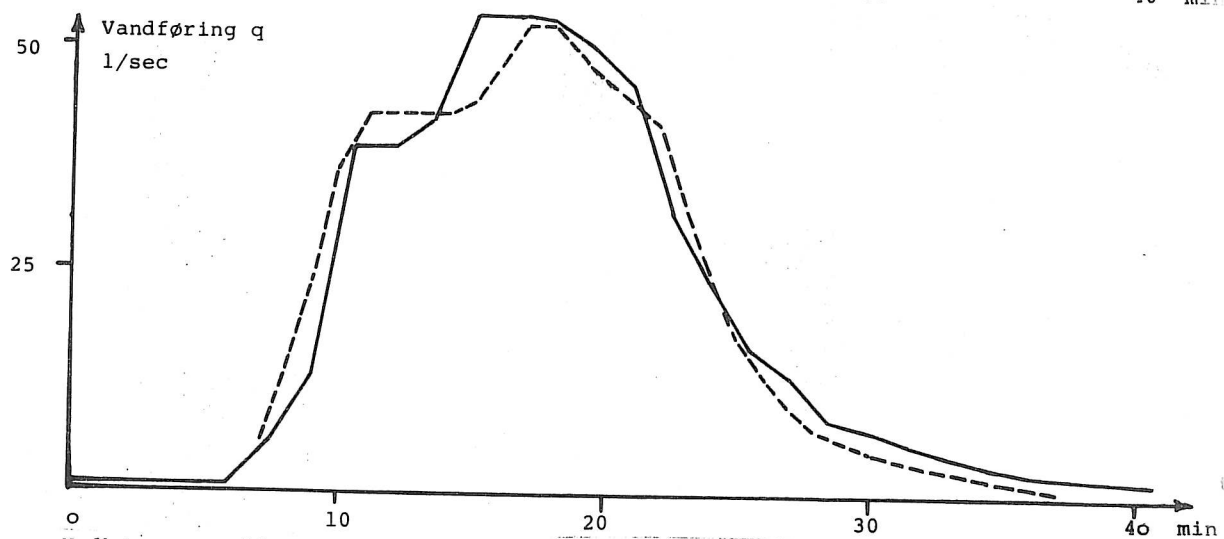
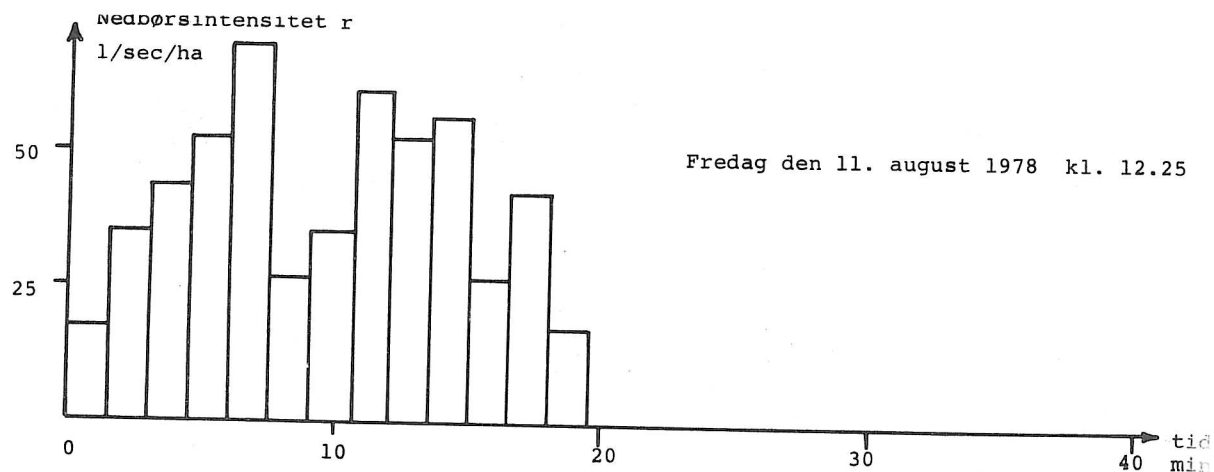


Målerenden er patentanmeldt af  
 civilingeniør Torben Willemoes Jørgensen og  
 civilingeniør Torben Larsen

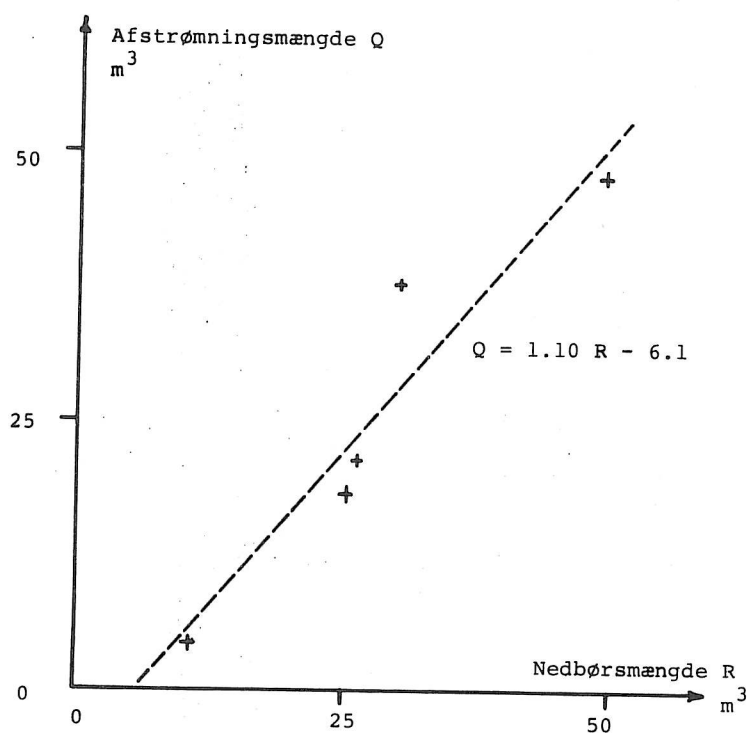


Laboratoriet for Hydraulik og Havnebygning  
 Aalborg Universitetscenter  
 Målerende for vandføringsmåling





Nedbør og vandføring under en tordenbyge d. 11.8.1978



Sammenhæng mellem nedbørsmængde og afstrømningsmængde ved 5 regnskyl sommeren 1978

Laboratoriet for Hydraulik og Havnebygning  
Aalborg Universitetscenter

Målte værdier af nedbør og afstrømning